








# Evaluación técnica de un sistema de digestión anaerobia en zona rural para la maximización de la producción de biometano

Artículo largo



Juan Manuel Nieto Cifuentes<sup>1</sup> ; María Paula Rodríguez Castro<sup>1</sup> ; Miguel Casallas-Ojeda<sup>2,3</sup> ; Angélica María Candela Soto<sup>4</sup> ; Paola Andrea Acevedo Pabón<sup>1,5</sup> ; Jhessica Daniela Mosquera Tobar<sup>6</sup> ; Iván Orlando Cabeza Rojas<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Grupo de investigación INAM - USTA, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Carrera 9 No. 51 - 11, Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería. Departamento de Procesos Químicos y Biotecnológicos. Universidad de La Sabana. Campus del Puente del Común, Km. 7, Autopista Norte de Bogotá. Chía, Cundinamarca, Colombia.

<sup>3</sup>Programa Doctoral en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana, Campus Universitario Puente del Común, Km. 7 Autopista Norte de Bogotá, 250001, Chía, Cundinamarca, Colombia

<sup>4</sup>Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas, Facultad de Química Ambiental, Universidad Santo Tomás, Floridablanca 681003, Colombia

<sup>5</sup>Ingenio Induspymes, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Cooperativa de Colombia, Avenida Caracas 37 – 63, Bogotá, Colombia

<sup>6</sup>Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional, Carrera 45 No. 26 – 85 edificio Uriel Gutiérrez, Bogotá, Colombia.

\*ivan.cabeza@unisabana.edu.co

## Resumen

Se desarrollaron ensayos de codigestión anaerobia a escala de laboratorio entre porquinaza y residuos sólidos urbanos (RSU) para garantizar la estabilidad del proceso y en un futuro replicarlo en un biodigestor tipo Taiwan. Empleando un diseño factorial de 3 niveles  $3^2$ , se obtuvieron 9 combinaciones con diferentes tiempos de ensayo (TE) y relaciones carbono/nitrógeno (C/N) de 20, 25 y 30 para ambos parámetros, buscando determinar la mejor combinación con respecto a la producción de metano. Se fijaron las variables carga orgánica (OLR) en 1,5 y relación sustrato inóculo en 3. Posteriormente mediante el método de desplazamiento de volumen se obtuvo la producción acumulada de biogás y el rendimiento del sistema. Se determinó que la mejor combinación fue la evaluada con un TE de 20 días y OLR de 3,12 g de porquinaza, 3,58 g de RSU (46,56 y 53,43 %p respectivamente), se alcanzó un rendimiento de 680,09 mL de biogás/gSV y un potencial bioquímico de metano de 282,24 mLCH<sub>4</sub>/gSV.

### Palabras clave:

Biodigestor anaerobio; Co-digestión; Porquinaza; Producción de energía; Residuos sólidos urbanos.

## Technical evaluation of an anaerobic digestion system in a rural area for the maximization of methane (CH<sub>4</sub>) production.

### Abstract

Laboratory-scale anaerobic co-digestion tests were developed between pig manure and urban solid waste (MSW) to guarantee the stability of the process and in the future replicate it in a Taiwan-type biodigester. Using a 3-level factorial design  $3^2$ , 9 combinations were obtained with different test times (TT) and carbon/nitrogen (C/N) ratios of 20, 25 and 30 for both parameters, seeking to determine the best combination concerning methane production. The organic load variables (OLR) were set at 1.5 and the inoculum substrate ratio at 3. Subsequently, the accumulated biogas production and the system performance were obtained using the volume displacement method. It was determined that the best combination was the one evaluated with a TT of 20 days and OLR of 3.12 g of porquinaza, 3.58 g of MSW (46.56 and 53.43 %w respectively), a yield of 680.09 mL of biogas/gSV was achieved and a biochemical methane potential of 282.24 mLCH<sub>4</sub>/gSV.

### Keywords:

Anaerobic biodigester; Co-digestion; Pig manure; Energy production; Municipal solid waste.

**Forma de citar:** Nieto Cifuentes, J. M., Rodríguez Castro, M. P., Casallas-Ojeda, M., Candela Soto, A. M., Acevedo Pabón, P. A., Mosquera Tobar, J. D., Cabeza Rojas, I. O. (2023). Evaluación técnica de un sistema de digestión anaerobia en zona rural para la maximización de la producción de biometano. RedBioLAC, 7, 28-34.

## Introducción

El incremento de las poblaciones a nivel mundial y la conglomeración de personas en zonas urbanas, ha traído consigo un aumento en la demanda de servicios de abastecimiento tales como alimentos, agua, materias primas y energía (Al-Zuahiri *et al.*, 2015). Particularmente, en Colombia se debe resaltar que aquellas actividades propias del sector agropecuario tales como la ganadería, piscicultura, porcicultura, entre otras, deben adaptarse a las demandas de calidad y sostenibilidad que están emergiendo en la legislación nacional.

En principio se debe tener en cuenta que en el sector agropecuario tiene un gran impacto en los diferentes municipios a nivel económico, social y ambiental. Este es el caso de San Antonio del Tequendama (Cundinamarca), para este sitio en 2019 la producción agrícola y pecuaria correspondió al 53 % y 46 % respectivamente del total de las actividades económicas comparadas con el turismo, que representa el 1 %. Dentro de la industria pecuaria la producción porcícola es la más representativa, (53 %) (Navas y Torres, 2019). La porquinaza, es un residuo generado de esa industria y es mezcla de orina y excrementos de los cerdos. Usualmente se emplea como abono orgánico, pero actualmente no hay suficiente terreno donde se pueda utilizar directamente. Por ello cuando se desarrollan actividades con gran cantidad de animales se tienen problemas de manejo, desencadenando problemáticas ambientales, que se agravan con el desconocimiento de alternativas de tratamiento y valorización (Sánchez *et al.*, 2020).

Otro flujo de residuos importante a nivel mundial son los residuos sólidos urbanos (RSU), los cuales están compuestos principalmente por frutas, verduras y en general alimentos con y sin cocción y otros residuos putrescibles que al descomponerse generan olores desagradables. Se estima que alrededor del 80 % de los RSU son llevados a disposición final y tan solo el 20 % se disponen rellenos sanitarios (Sandoval *et al.*, 2020) por lo cual su inadecuada gestión genera emisiones de gases de efecto invernadero, además de contribuir a la reducción la vida útil de los sitios de disposición, que para el caso particular de Colombia ya se está acabando en muchas zonas del país.

En la finca El Recuerdo de la vereda Santivar ubicada al nororiente del municipio de San Antonio del Tequendama, con una altitud de 1980 m.s.n.m. y temperatura promedio de 21 °C a 23 °C, se desarrolla un proceso de digestión anaerobia (DA) en un biodigestor anaerobio tipo Taiwán usado para la transformación de la porquinaza. El metano producido es utilizado para la cocción de alimentos, y el biol como abono para los cultivos de la finca. Sin embargo, a través de visitas de campo hechas a la finca se identificó que la eficiencia del biodigestor no es la adecuada debido a que la producción de biogás no es constante y por tanto no

es posible contar como una fuente continua de combustible para su uso en la cocina, adicionalmente, el biol contiene materia orgánica sin degradar. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar diferentes tiempos de ensayo (TE) y la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) de la codigestión anaerobia de porquinaza y Residuos Sólidos Urbanos (RSU) (residuos orgánicos provenientes de las actividades culinarias) a escala de laboratorio en ensayos de potencial bioquímico de metano (PBM), a través de un diseño experimental de 3 niveles 3<sup>2</sup>.

## Metodología

### Sustratos e inóculo

La porquinaza se tomó de la finca El Recuerdo, donde se estima una producción actual de 56,97 kg/día acorde con Escalante *et al.*, (2010). Los RSU provienen de las actividades culinarias y agrícolas que se llevan a cabo al interior de la finca. De acuerdo con Castañeda y Rodríguez (2017), Colombia presenta una producción per cápita de RSU de 0,7 kg/hab día, por tanto, se dispondría de 2,8 Kg/día en la finca. Se consideró principalmente la fracción orgánica de frutas, vegetales y comidas procesadas. El inóculo se obtuvo de un biodigestor anaerobio que trata las aguas residuales lácteas de una empresa del municipio de Sopó. Ambas muestras se mantuvieron refrigeradas a 4 °C hasta su uso (Astals *et al.*, 2020).

### Diseño experimental

Se empleó un diseño factorial de 3 niveles 3<sup>2</sup> en el software Statgraphics® (versión libre), evaluando el TE y la C/N (Tabla 1) con el propósito de identificar las mejores condiciones de las variables dependientes que afectan las variables de respuesta (la producción de metano y la concentración de AGVs), de manera que el proceso pueda escalarse a un reactor piloto instalado en la finca de donde se tomaron los residuos. La variable TE fue seleccionada debido a que es necesario establecer el tiempo necesario para que los sustratos se degraden, de manera que se no sobre cargue el sistema, induciendo a inestabilidades o fracaso del proceso. Por su parte, el equilibrio de la C/N determina los nutrientes del sistema que dependerán de las características de los sustratos empleados (Casallas-Ojeda *et al.*, 2020).

Bayona y Cortez (2015) mencionan que para la porquinaza los tiempos de retención hidráulicos de una finca con un aproximado de 20 cerdos como en el caso de este estudio, puede oscilar entre 20 y 30 días por lo cual se definieron los siguientes valores para TE 20, 25 y 30 días para esta variable. Se establecieron 3 valores (20, 25, 30) para la C/N de acuerdo con Castillo *et al.*, (2003), quienes destacan que las condiciones de producción de biogás son óptimas cuando los valores de C/N se encuentran alrededor de 30 en el caso de la porquinaza. Por su parte, para los RSU se debe tener en cuenta que valores menores a 15 y mayores a 35 ocasionan

problemas respecto a la generación de olores (Roman *et al.*, 2013). Se fijó la relación sustrato inóculo (S/X) en 3, basado en investigaciones previas (Dechrugsa *et al.*, 2013; Cabeza

*et al.*, 2016). Por su parte la carga orgánica (OLR) se dejó constante en 1,5 gSV/L ya que según Duan, *et al.*, (2019), el valor óptimo es de 1,89 gSV/L.

**Tabla 1** | Diseño Experimental Factorial de 3 Niveles 3<sup>3</sup>.

ID	TE (días)	C/N	OLR (gSV/L)	Estiércol (g)	RSU (g)	Total (g)
C1	20	20	1,5	1,25	6,28	7,53
C2	20	30	1,5	3,12	3,58	6,70
C3	20	25	1,5	2,23	4,85	7,08
C4	25	20	1,5	1,25	6,28	7,53
C5	25	30	1,5	3,12	3,58	6,70
C6	25	25	1,5	2,23	4,85	7,08
C7	30	20	1,5	1,25	6,28	7,53
C8	30	30	1,5	3,12	3,58	6,70
C9	30	25	1,5	2,23	4,85	7,08

**Nota:** C1 a C9 son el nombre dado a las diferentes combinaciones realizadas.

### Ensayos PBM y métodos analíticos

Se usaron botellas ambar de 250 mL, a cada una se adicionaron 12,25 mL de inóculo, 180,22 mL de agua y la cantidad de sustratos que correspondieran a cada configuración experimental expuesta en la **Tabla 1**. Cada ensayo se llevó a cabo por duplicado para contar con representatividad de los datos obtenidos. Para estimar la producción diaria de biogás de cada configuración, se usó el método de desplazamiento alcalino mediante el uso de una solución de NaOH al 0,1 N contenido en una botella invertida. Posterior a establecer la cantidad de biogás producido se llevó a cabo la medición del CH<sub>4</sub> presente en cada muestra de biogás tomada para cada combinación (C1-C9), esto se llevó a cabo mediante el equipo Biogás 5000 LANDTEC®. También se calculó el rendimiento de biogás a partir de los mL de gas producido y gSV añadidos. Finalmente se realizó el proceso de titulación para cuantificar los ácidos grasos volátiles (AGVs) acorde con APHA, (2017) presentes en el digestato. Los ensayos se mantuvieron en un baño térmico a una temperatura de 21-23 °C, para simular las condiciones reales de la finca objeto de estudio.

Los sustratos fueron caracterizados en términos de humedad, nitrógeno Total de Kjeldahl (NTK), sólidos totales (ST) y volátiles (SV) (2450G), materia orgánica (MO) que fue el resultado de la relación entre el contenido de la humedad y los sólidos volátiles ya que la fracción es determinada

mediante la exposición de los sustratos a una temperatura de 550 °C puesto que allí el contenido de humedad se evapora y los sólidos totales se volatilizan. La C/N se calculó a partir del carbono orgánico presente en la MO y el NTK y demanda química de oxígeno DQO (5520B), lo anterior de acuerdo con el procedimiento de Estándar Métodos (APHA, 2017). Los resultados de estas mediciones se encuentran resumidos en la **Tabla 2**. Una vez finalizados los experimentos se tomaron las variables evaluadas y las de respuesta para desarrollar un análisis ANOVA en el software MiniTab® en su versión libre.

### Resultados y discusión

#### Caracterización fisicoquímica inicial

Las características fisicoquímicas iniciales (Ver **Tabla 2**) permitieron obtener la relación C/N, la cual fue un factor fundamental para la consolidación del diseño experimental, particularmente las cantidades de sustratos a agregar en las combinaciones. El valor del Nitrógeno del estiércol resulta ser de particular importancia para el cálculo de la relación C/N, pues el valor óptimo de esta variable permite asegurar que el pH no sufrirá mayores alteraciones y por lo tanto el proceso de codigestión tendrá una mayor estabilidad durante los diferentes tiempos de retención establecidos, lo cual garantiza la producción de metano (Wang *et al.*, 2012).

**Tabla 2** | Caracterización inicial.

Parámetro	Unidad	Estiércol	RSU	Inóculo
Humedad	%	64,79 ± 2,68	92,53 ± 0,75	-
NTK	%	1,72	1,56	-
ST	%	35,21 ± 2,68	7,47 ± 0,75	49,8
SV	%	27,04 ± 0,85	18,58 ± 0,31	41,1
Materia Orgánica	%	130,49	40,23	-
Relación C/N	-	44,00 ± 4,6	14,96 ± 1,77	-
DQO	mg/L	36.700	18.700	-

## Producción de biogás

Las combinaciones de mayor producción de biogás (Figura 1a) para cada tiempo corresponden a C1, C4 y C7 con un valor total de 1368, 1669 y 2500 mL de biogás, en un TE de 20, 25 y 30 días respectivamente. De otro lado, las combinaciones C2, C5 y C8 correspondieron a la menor producción por cada TE (20, 25 y 30 días) y mayor C/N (30), obteniendo valores de 1024, 959 y 1577 mL de biogás. En general, los resultados obtenidos son superiores a los que se estiman en el trabajo de Rodríguez *et al.*, (2018), en el cual emplearon sustratos similares para llevar a cabo la DA, sin embargo, este mismo autor en el 2017 obtuvo valores que se asemejan significativamente a los que se obtienen en el presente trabajo (Rodríguez, *et al.*, 2017). En la Figura 1b es posible apreciar que las combinaciones que fueron cargadas con la misma cantidad de estiércol y residuos orgánicos en los diferentes TE presentaron un comportamiento ligeramente similar en términos de la cantidad de biogás producido. De lo anterior se puede

evidenciar que las combinaciones con mayor cantidad de RSU fueron las de mayor producción de biogás.

## Resultados del monitoreo del proceso

Los resultados de los parámetros de seguimiento se encuentran en Tabla 3. De acuerdo con los datos reportados con respecto a la producción diaria de biogás, los valores para cada uno de los TE corresponden a 60,66 mL/día (20 días), 54,66 mL/día (25 días) y 71,33 mL/día (30 días). Al culminar los diferentes TE se procedió a cuantificar el rendimiento para cada una de las combinaciones a partir de la producción acumulada en mL y los gSV de cada digestato, lo cual permite identificar el comportamiento de los microorganismos dentro de reactores respecto a la carga orgánica inicial. Con estos valores es posible enfatizar que a mayor TE, el comportamiento con respecto a la producción de biogás será mayor, puesto que las poblaciones de microorganismos presentes en las diferentes etapas de la digestión anaerobia logran estabilizarse (Romeu, 2018).

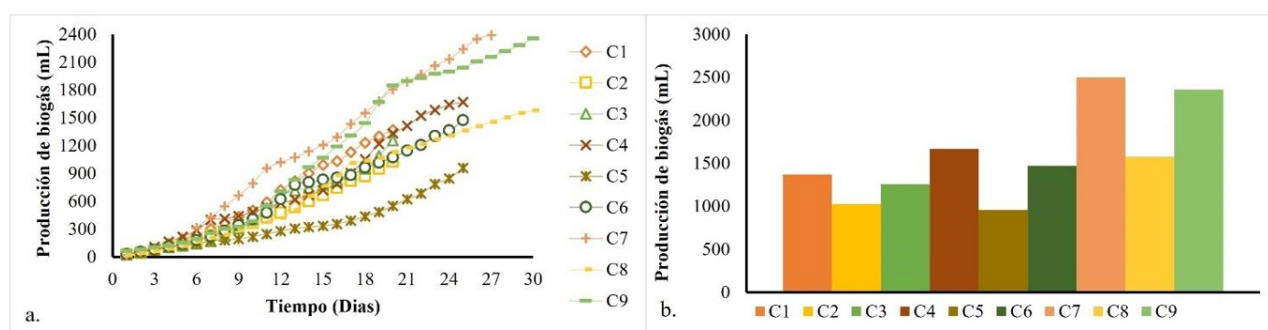


Figura 1 | a. Producción Diaria Acumulada de Biogás de las Combinaciones Evaluadas. b. Producción Acumulada de Biogás de las Combinaciones Evaluadas.

Tabla 3 | Parámetros de seguimiento de los ensayos de codigestión obtenidos.

IID	Producción diaria de biogás (mL/día)	Rendimiento de biogás (mL/gSV)	CH <sub>4</sub> (%)	PBM (mLCH <sub>4</sub> /gSV)	SV del Digestato (g/L)	AGVs (mg DQO/L)	pH Promedio
C1	68 ± 4,06	907,87 ± 12,26	4,8 - 17,4	43,58 - 157,97	0,52 ± 0,11	1380 ± 108	6,58
C2	51 ± 6,19	680,09 ± 23,10	3,0 - 41,5	20,40 - 282,24	0,58 ± 0,13	392 ± 36,66	6,97
C3	63 ± 5,96	837,22 ± 22,79	2,6 - 7,9	21,77 - 66,14	0,72 ± 0,02	732 ± 60	6,88
C4	67 ± 7,54	1106,72 ± 39,92	1,4 - 1,8	15,49 - 19,92	0,59 ± 0,24	1092 ± 84	5,40
C5	38 ± 5,31	636,44 ± 28,14	2,4 - 35,5	15,27 - 225,94	0,76 ± 0,26	452 ± 6,35	7,11
C6	59 ± 6,00	981,93 ± 30,56	1,5 - 19,5	14,73 - 191,48	0,47 ± 0,17	1332 ± 60	8,04
C7	83 ± 6,18	1657,18 ± 32,89	1,5 - 3,6	24,86 - 59,66	0,57 ± 0,03	1056 ± 24	5,32
C8	53 ± 5,50	1052,67 ± 21,01	2,3 - 26,5	24,21 - 278,96	0,7 ± 0,18	1620 ± 108	6,40
C9	78 ± 5,44	1560,04 ± 24,93	1,7 - 7,1	26,52 - 110,76	0,54 ± 0,04	216 ± 48	8,06

**Nota.** Los valores reportados para el CH<sub>4</sub> corresponden a un rango el cual se establece a partir de las 3 réplicas obtenidas, teniendo en cuenta la de menor y mayor producción. Su variación se debe a posibles fallas de la hermeticidad de los biorreactores y/o fugas de las botellas con solución de NaOH al 0,1 N.

Se identificó que las combinaciones que presentaron un mayor PBM (Ver [Figura 1a](#)) corresponden a aquellas cargadas con 3,12 g de porquinaza y 3,58 g de RSU es decir, 46,56 y 53,43 %p respectivamente, a su vez los reactores cargados con 2,23 g de estiércol y 4,85 g de RSU evidencian una producción intermedia (32,74 y 67,23 %p, respectivamente), por último, en promedio se determina que la combinación de 1,25 g de estiércol y 6,28 g de RSU son poco eficientes en cuanto a la producción de biogás se refiere, esta fue equivalente en %p a 83,39 y 16,60 respectivamente. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que la mayor cantidad de biometano se alcanza cuando los residuos se encuentran en %p similares (50:50), lo cual puede atribuirse a que los RSU son residuos de fácil degradación y por tanto acidifican rápidamente el medio debido a la producción rápida de subproductos intermedios como lo son los AGVs ([Parra-Orobio et al., 2018](#)).

En cuanto a los SV, se puede observar una remoción del 50 al 69 % lo cual implica que los microorganismos degradan la materia orgánica de las muestras y esta es transformada en el biogás producido. En torno a la relación entre la remoción de SV y el TE, se obtuvo un valor de remoción del 60 % para cada TE (20, 25 y 30). A partir de esto, se puede afirmar que no hay una implicación directa entre esta variable y el comportamiento de los microorganismos. Sin embargo, [Castillo et al. \(2003\)](#), encontraron una relación directa entre el TE y la remoción de ST y SV de los RSU, por lo que a medida que el tiempo aumenta, mayor será el porcentaje de remoción. Además, [Álvarez y Lidén \(2008\)](#) explican que el comportamiento obtenido con respecto a la disminución de producción de biogás se puede deber al aumento de las concentraciones de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) que inhiben las bacterias metanogénicas. A su vez, se puede establecer una relación entre los SV y la producción de metano, ya se observa que a medida que la cantidad de SV aumenta el PBM disminuye, lo cual implica que, a mayores SV, menor es la degradación de la materia orgánica al igual que la producción de biogás. Este comportamiento también es reportado en el estudio realizado por [Mosquera \(2020\)](#).

[Sánchez et al. \(2016\)](#) y [Casallas Ojeda et al. \(2021\)](#), exponen que, dentro del conjunto bacteriano, los organismos que llevan a cabo la acidogénesis y acetogénesis lo realizan con un mejor rendimiento en un pH de 5,5 a 6,5, a su vez las bacterias metanogénicas presentan un mejor desempeño en el rango 7,8 a 8,2. Según los resultados los digestatos presentaron un pH entre 5,32 y 8,06 (Tabla 3), C1, C4 y C7, se caracterizan por un pH cercano a 5, por lo cual es probable que en estas combinaciones el proceso se inhibió, lo cual conllevó a que el proceso de fermentación se vuelva más lento o se detenga, debido a la acidez presente, la cual podría atribuirse principalmente a los RSU ([Reyes, 2018](#)).

De acuerdo con [Marchaim \(1992\)](#), AGVs son producto del proceso de degradación que llevan a cabo las bacterias anaerobias con respecto a la materia orgánica,

específicamente los AGVs se forman en la fase de fermentación, lo que puede desencadenar acidificación y conlleva a una disminución de pH. Los RSU se caracterizan por el contenido de nutrientes específicamente (i.e. celulosa, carbohidratos, xilosas, pectinas) favoreciendo la producción de AGVs ([Gil et al., 2012](#); [Escarraga y Espinosa, 2019](#)). [Montes \(2008\)](#), afirma que el rango óptimo está dado de 50 a 500 mg DQO/L con un máximo de 2000 mg DQO/L. Para este trabajo se evidenció que el rango AGVs osciló entre 216 a 1620 mg DQO/L, dejando ver que solo tres de las nueve combinaciones (C2, C5 y C9) se encuentran en el rango de interés y a su vez los contenidos de estas tres muestras evidencian que los valores de  $\text{CH}_4$  son significativos dentro del estudio. Siendo C2 la de mayor BMP y la segunda con menor concentración de AGVs al final del proceso, lo cual lleva a afirmar que es una de las mejores combinaciones de todas y tiene atributos para ser evaluada a una escala superior. De otro lado, las combinaciones C1, C4, C6, C7 y C8 obtuvieron concentraciones de AGVs superiores a 1000 mg DQO/L, esto influyó en las producciones de PBM alcanzadas, debido a que el proceso pudo presentar alteraciones en las poblaciones de las arqueas metanogénicas, encargadas de la transformación de AGVs en  $\text{CH}_4$  ([Parra-Orobio et al., 2018](#)).

De igual forma, [Escarraga y Espinosa, \(2019\)](#), explican que el valor del pH en el digestor presenta una relación directamente proporcional con respecto a la producción de metano, ya que si se presenta una disminución del pH a valores  $\leq 6$  el contenido de  $\text{CH}_4$  en el biogás será escaso caracterizándose como pobre, por tanto, el biogás obtenido no tendrá un buen poder calorífico para llevar a cabo adecuada combustión y por tanto su llama será débil. La prueba de DQO se les realizó a aquellas combinaciones con una mayor producción acumulada de biogás (C1, C4 y C7). Los valores reportados al final del proceso de digestión son 8200 mg/L, 5200 mg/L y 11700 mg/L dando como resultado una remoción del 85,20 %, 90,61 % y 78,88 % respectivamente, lo cual permite conocer la eficiencia del proceso de DA.

Finalmente, se desarrolló un análisis ANOVA de un factor con un nivel de significancia del 5 % para cada una de las variables de respuesta a través del software MiniTab®. Se encontró que la variable más incidente en el proceso es la relación C/N para la cual se halló un valor  $p$  de 0,019, por su parte este valor para TE se encontró en 0,963, valor superior a 0,05 que es el límite para indicar si una variable incide o no. Como se ha mencionado previamente, la relación C/N está relacionada con la concentración de nutrientes y de esta dependerá el desempeño del proceso. Sin embargo, esto depende de las características de los sustratos, pH y la temperatura del proceso ([Fernandez et al., 2012](#)). En este sentido los mayores valores de producción de metano se hallaron en valores de C/N de 30, por lo cual este valor sería el recomendado para llevar a cabo mezclas entre porquinaza y RSU.

## Conclusión

Los RSU son un sustrato con alto contenido de nutrientes, que al combinarse con el estiércol de cerdo dentro del proceso de codigestión contribuyen a la generación de metano, por lo que debe tenerse en cuenta la relación de carga entre estos. En ese sentido se identificó que cuando se usan porcentajes (p/p) de RSU superiores a 67 % el proceso no es exitoso ya que se hallaron problemas de inhibición por AGVs. Por el contrario, cuando se emplean combinaciones 46,56 y 53,43 (%p de porquinaza y RSU) no se presenta inestabilidad por AGVs, lo que hace se que encuentren valores de BMP superiores (282,24 mLCH<sub>4</sub>/gSV). En resumen, la mejor combinación evaluada y el mejor TE y C/N se identificó en 3,12 g de estiércol y 3,58 g de RSU, 20 días de proceso y 30 para la C/N, por lo cual estas son las condiciones operacionales recomendadas para evaluar en el digestor de tipo Taiwan con el cual se cuenta en la finca objeto de estudio. Estos resultados permiten el no abandono de los sistemas piloto que se encuentran en zonas rurales, viabilizando el proceso de digestión a escala. Además, permite la sustitución de combustibles fósiles usados para la cocción de alimentos por biometano generado a partir de los residuos agroindustriales obtenidos en regiones agropecuarias, las cuales cuentan con disponibilidad de estos sustratos.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Santo Tomás y al proyecto FODEIN 2020. Iván Cabeza y Miguel Casallas-Ojeda expresan su agradecimiento a la Universidad de La Sabana por la financiación del proyecto de convocatoria interna "Codigestión anaerobia de residuos agroindustriales con fines de valorización energética y agrícola" INGPLD-50-2022.

## Referencias

- Álvarez, R., & Lidén, G. (2008). Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*, 33(4), 726–734. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.05.001>
- Al-Zuairi, F., Pirozzi, D., Ausiello, A., Florio, C., Turco M., Micoli, L., Zuccaro, G., & Toscano, G. (2015). Biogas production from solid state anaerobic digestion for municipal solid waste. *Chemical Engineering Transactions*, 43: 2407-2412. <https://doi.org/10.3303/CET1543402>
- APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd edition).
- Astals, S., Koch, K., Weinrich, S., Hafner, S. D., Tait, S., & Peces, M. (2020). Impact of Storage Conditions on the Methanogenic Activity of Anaerobic Digestion Inocula. *Water*, 12(5), 1321. <https://doi.org/10.3390/w12051321>
- Bayona, C. & Cortés, B. (2015). Producción de biogás a partir de estiércol porcino a escala piloto: caso de estudio biorreactor continuo tubular plástico (BCTP) finca Tosoly [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].
- Cabeza, I., Thomas, M., Vasquez, A., Acevedo, P. & Hernández, M. (2016). Anaerobic co-digestion of organic residues from different productive sectors in Colombia: biomethanation potential assessment. *Chemical engineering transactions*, 49, 385–390. <https://doi.org/10.3303/CET1649065>
- Casallas-Ojeda, M., Torres-Guevara, L. E., Caicedo-Concha, D. M. & Gómez, M. F. (2021). Opportunities for waste to energy in the milk production industry: perspectives for the circular economy. *Sustainability*, 13(22), 12892. <https://doi.org/10.3390/su132212892>
- Castañeda, S. & Rodriguez, J. (2017). Modelo de aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos en Cundinamarca, Colombia. *Universidad y Salud*, 19(1), 116-125. <https://doi.org/10.22267/rus.171901.75>
- Castillo, M., Cristancho, D. & Arellano, V. (2003). Estudio de las condiciones de operación para la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 5(2): 11–22.
- Dechruga, S., Kantachote, D. & Chaiprapat, S. (2013). Effects of inoculum to substrate ratio, substrate mix ratio and inoculum source on batch co-digestion of grass and pig manure. *Bioresource Technology*, 146: 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.051>
- Duan, N., Zhang, D., Lin, C., Zhang, Y., Zhao, L., Liu, H. & Li, Z. (2019). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: Methane production, mass flow, reactor scale and heating scenarios. *Journal of Environmental Management*, 231: 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.062>
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (2010). Anexo E. En Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia.
- Escarraga, K., & Espinosa, N. (2019). Evaluación de la obtención de biogás mediante la digestión

- anaerobia de los residuos de fruta generados por una empresa de alimentos a escala laboratorio [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8176>
- Fernandes, T. V., Keesman, K. J., Zeeman, G., van Lier, J. B. (2012). Effect of ammonia on the anaerobic hydrolysis of cellulose and tributyrin. *Biomass and Bioenergy*, 47, 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.029>
- Gil, M., Soto, A., Usma, J., & Gutierrez, O. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + limpia*. 7(2): 52-73.
- Jaramillo Arango, J. G., Rodríguez Cortés, P., Jaimes-Estevez, J., Castro Molano, L., & Escalante Hernández, H. (2021). Efecto del diseño bioclimático sobre el comportamiento térmico: caso de estudio de dos digestores operando bajo condiciones psicrófilas. *RedBioLAC*, 5: 4-8.
- Marchaim, U., & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1992). *Biogas Processes for Sustainable Development*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://digitallibrary.un.org/record/131826?ln=es>
- Montes, M. E. (2008). Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio institucional de la Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/1049/>
- Mosquera, J., Acevedo, P., Cabeza, I., Santis, A., Varela, L., & Villamizar, S. (2020). Improving anaerobic co-digestion of different residual biomass sources readily available in Colombia by process parameters optimization. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105790. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105790>
- Navas, L., & Torres, W. (2019). Observatorio socio-económico - Vereda Santivar - Sector Pueblo Nuevo del municipio de San Antonio del Tequendama en Cundinamarca. [Tesis de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional - Universidad Cooperativa de Colombia.
- Parra-Orobio, B. A., Angulo-Mosquera, L. S., Loaiza-Gualtero, J. S., Torres-López, W. A., & Torres-Lozada, P. (2018). Inoculum mixture optimization as strategy for to improve the anaerobic digestion of food waste for the methane production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 1529-1535. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.048>
- Reyes, E. (2018). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí*. 24: 60–81. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>
- Rodríguez, A., Ángel, J., Rivero, E., Acevedo, P., Santis, A., Cabeza, I., Acosta, M., & Hernández, M. (2017). Evaluation of the biochemical methane potential of pig manure, organic fraction of municipal solid waste and cocoa industry residues in Colombia. *Chemical Engineering Transactions*. 57: 55-60. <https://doi.org/10.3303/CET1757010>
- Rodríguez, A., Zuleta, J., Garzón, A., Avendaño, S., Alvarez, Y., Cabeza, I., Santis, A., & Acevedo, P. (2018). Anaerobic Co-digestion of Pig Manure, Organic Fraction of Municipal Solid Waste, Fruit Residues of Drinks Industry and Cocoa Residues. *Chemical Engineering Transactions*. 64: 499-504. <https://doi.org/10.3303/CET1864084>
- Roman, P., Martinez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. FAO Chile.
- Romeu Luque, P. (2018). Efecto del tiempo de retención hidráulica sobre la dinámica poblacional en un reactor anaerobio de membranas para el tratamiento de aguas residuales. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional - Universidad Politécnica de Valencia.
- Sánchez-Gómez, J. S., Fuenzalida-Sandoval, E. A., Sánchez-Amézquita, L., Cassés-Franceschi, D., Rivera-Ramos, L. C., Reyes-Barrios, L. H., y Fajardo-Pinilla, J. M. (2020). Aprovechamiento del biosol producido por biodigestión anaerobia de porquinaza para la fertilización de rábano rojo. *Revista Ontare*, 8, 89-105. <https://doi.org/10.21158/23823399.v8.n0.2020.2677>
- Sandoval-Cobo, J. J., Casallas-Ojeda, M. R., Carabalí-Orejuela, L., Muñoz-Chávez, A., Caicedo-Concha, D. M., Marmolejo-Rebellón, L. F., & Torres-Lozada, P. (2020). Methane potential and degradation kinetics of fresh and excavated municipal solid waste from a tropical landfill in Colombia. *Sustainable Environment Research*, 30, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00048-6>
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, 120, 78-83. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.058>